نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۰ ص.۲۳۱-۲۱۷

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 2, June. July. 2021, p. 217- 231

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی تولید کف در خشک‌کردن کف‌پوشی آب کرفس و ارزیابی خواص پودر تولیدی

مهسا کمالی سروستانی[۱]- محبت محبی[۲]*- مسعود تقی‌زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳

چکیده

در این پژوهش، تولید پودر آب کرفس با استفاده از روش خشک کردن کف‌پوشی مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط تولید کف بهینه آب کرفس از نظر غلظت صمغ زانتان (۰/۴۵- ۰/۲۵ درصد) به‌عنوان پایدارکننده کف، مقدار کنسانتره پروتئین آب‌پنیر (۶ -۲ درصد) به‌عنوان عامل کف‌زا و زمان هم‌زدن (۱۰- ۲ دقیقه) جهت ایجاد کف با کمترین مقدار دانسیته و بیشترین پایداری با استفاده از روش سطح پاسخ تعیین شد. سپس کف بهینه تولیدی در سه دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۳ میلی‌متر خشک شد و پودرهای تولیدی از نظر رطوبت، فعالیت آبی، دانسیته توده، دانسیته ضربه، دانسیته ذره، تخلخل و میزان پیوستگی و جریان‌پذیری مورد مطالعه قرار گرفتند. در نهایت مشخص شد که افزایش دمای خشک کردن از ۴۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر معناداری ($p<0/05$) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودرها داشت و سبب کاهش میزان رطوبت، فعالیت آب، دانسیته توده، دانسیته ضربه، دانسیته ذره و نسبت هاسنر و شاخص کار شد ولی میزان تخلخل افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آب کرفس، خشک کردن کف‌پوشی، روش سطح پاسخ، خواص فیزیکوشیمیایی.

مقدمه

اکثر میوه‌ها و سبزی‌ها حاوی مقادیر زیادی آب و شکر هستند که آن‌ها را فسادپذیر می‌کند. برای جلوگیری از فساد و کنترل ذخیره طولانی مدت آن‌ها، روش‌های مختلفی برای نگهداری میوه و سبزی‌ها وجود دارد که خشک‌کردن میوه و سبزی‌ها در سطح قابل اطمینانی از رطوبت، روش مناسبی برای نگهداری آن‌ها است. امروزه استفاده از مواد غذایی به شکل پودر به دلیل ماندگاری بالا، بسته‌بندی و حمل و نقل آسان و ایجاد رنگ و طعم خاص و حلالیت در آب، افزایش یافته است و منجر به استفاده از پودر مواد غذایی به‌عنوان یک غذای اصلی، همچون پودر شیر قهوه و کاکائو و یا به‌صورت جزئی از فرمولاسیون مواد غذایی از جمله نوشیدنی‌ها، بستنی، نان کیک و سس‌ها- شده است (Jaya *et al*, 2004).

کرفس با نام علمی *Apium graveolens* گیاهی است علفی، دو ساله، از خانواده چتریان *Umbellifera* که کرفس معمولی (*Aog. Var. dulce*) در ایران در سطح نسبتاً وسیعی کشت می‌شود (پیوست، ۱۳۸۴). بخش خوراکی این گیاه شامل قسمت‌های مختلف به‌ویژه برگ و ساقه آن است. برگ‌ها حاوی مقادیر زیادی ویتامین A بوده و به علت وجود ترپین[۴] (دسته‌ای از مواد آلی که عمدتا توسط گیاهان تولید می‌شوند و بیشتر آن‌ها هیدروکربن می‌باشند) بسیار معطرند؛ و به‌عنوان طعم‌دهنده و چاشنی در بسیاری از غذاها می‌توان استفاده کرد. ساقه کرفس دارای مواد معدنی مانند منیزیم و پتاسیم و برای آرامش اعصاب مفید است. همچنین کرفس حاوی مقادیر زیادی ویتامین‌های گروه B و K و C و کلسیم و آهن است. کرفس به علت دارا بودن فسفر زیاد، در ارتقاء هوش و افزایش شیر مادر مؤثر است. از دیگر خواص کرفس می‌توان به خاصیت ضد شنج، نیروبخش بودن آن و به‌عنوان دارویی در برابر تنگی نفس، برونشیت، مشکلات کلیه و مثانه مانند عفونت مجاری ادرار، سنگ کلیه و همچنین فشار خون بالا و دیابت اشاره کرد (Madamba et al, 2001).

کرفس به‌جز ایران در غذاهای مناطق گرمسیری کشورهایی نظیر هندوستان و ایالت لوئیزیانای آمریکا هم مصرف زیادی دارد. در مجموع می‌توان کرفس را از گیاهان معجزه آسا نامید که در یونان و چین باستان به‌عنوان یک گیاه معطر و دارویی مورد استفاده قرار می‌گرفته است، اما از قرن شانزدهم کرفس به‌عنوان یک نوع سبزی مصرف غذایی دارد (آملی، ۱۳۸۴؛ پیوست، ۱۳۸۴).

یکی از روش‌های خشک‌کردن مواد غذایی، خشک‌کردن به‌روش کف‌پوشی[۵] است. خشک‌کردن کف‌پوشی فرآیندی است که در آن مواد

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استاد و استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(*-نویسنده مسئول: Email: mohebbatm@gmail.com)

DOI: 10.22067/ifstrj.v17i2.84467
4 Terpin
5 Foam Mat Drying

مایع به‌وسیله ترکیب گاز به داخل آن به کف پایدار تبدیل شده، سپس توسط جریان هوای داغ در فشار اتمسفر خشک می‌شوند و به شکل ورق نازک متخلخل درمی‌آیند (Hertzendorf *et al*, 1970). ساختار متخلخل کف منجر به ایجاد خواص مطلوبی در ماده، همچون جذب سریع‌تر آب، سرعت بالای خشک شدن و در نتیجه استفاده از دمای کمتر، سبب حفظ ترکیبات مغذی و فرار ماده غذایی می‌گردد. گزارش شده است که فرآیند خشک کردن کف‌پوشی، ارزان‌تر از روش‌های خشک کردن پاششی، انجمادی و تحت خلأ است (Kadam *et al*, 2010). نکته حائز اهمیت در خشک کردن کف‌پوشی، بهینه‌سازی شرایط تولید کف از نظر میزان دانسیته و پایداری است که ضمن افزایش سرعت خشک کردن، امکان حفظ ساختار کف را در حین فرآیند فراهم می‌نماید.

خشک کردن کف‌پوشی برای محصولات گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: شیر سویا (Akintoye *et al*., 1991)، استارفروت (Karim *et al*., 1999)، انبه (Rajkumar *et al*., 2007)، موز (Thuwapanichayanan, 2007)، قارچ دکمه‌ای (پاسبان، ۱۳۹۱)، میگو (عزیزپور، ۱۳۹۱)، پوره سیب‌زمینی (پور مهدی، ۱۳۹۱)، ریز جلبک اسپیرولینا (عطاردی، ۱۳۹۳)، پنیر (ایزدی، ۱۳۹۳)، طالبی (صلاحی، ۱۳۹۴)، آبغوره (خرازپور، ۱۳۹۴).

پودر کرفس قابلیت کاربرد در فرمولاسیون مواد غذایی را به‌عنوان بهبوددهنده خواص تغذیه‌ای، طعم، حجم، عطر و کیفیت ماندگاری و نیز به‌عنوان یک جزء اصلی در ماکارونی، سوپ‌ها و خورشت‌های آماده، سس‌ها و فراورده‌های مشابه و نیز تولید قرص‌های خوراکی را نیز دارد.

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شرایط تولید کف آب کرفس با استفاده از تکنیک سطح پاسخ و بررسی تأثیر دمای خشک کردن بر برخی خواص فیزیکوشیمیایی پودرها مانند رطوبت و فعالیت آب، دانسیته توده و ضربه[1]، دانسیته ذره و تخلخل و جریان پذیری و پیوستگی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل کرفس، صمغ زانتان، کنسانتره پروتئین آب پنیر بودند. صمغ زانتان و کنسانتره پروتئین آب‌پنیر نیز به‌ترتیب از شرکت سیگما و میلی آلمان تهیه شدند.

آماده‌سازی نمونه‌های کف

آماده‌سازی محلول صمغ زانتان

جهت آب پوشی صمغ زانتان، محلول حاوی صمغ زانتان با غلظت‌های ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ درصد تهیه شد. مقادیر لازم هیدروکلویید همراه با مخلوط کردن توسط هم‌زن مغناطیسی به آب مقطر اضافه شد، پس از آن محلول صمغ به مدت ۲۴-۱۸ ساعت در یخچال قرار گرفت تا هیدراسیون کامل مولکول‌های صمغ انجام شود.

آماده‌سازی آب کرفس

کرفس پس از خریداری از بازار محلی مشهد تا زمان شروع آزمون در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. جهت انجام آزمایش کرفس‌ها شسته و سپس خشک شدند. عمل آبگیری سپس توسط آب‌میوه‌گیر (National Electric –۳۷۶ N) انجام شد.

برای تهیه کف، مقادیر مناسبی از محلول هیدروکلویید (۰/۴۵-۰/۲۵ درصد)، مقادیر لازم آب کرفس و کنسانتره پروتئین آب پنیر (۶-۲ گرم) به درون بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل شده به مدت ۵ دقیقه درون حمام آب بخار با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. در ادامه مخلوط حاصل به وسیله همزن خانگی (گاسونیک، ۲۵۰ W، GHM–۸۱۸، چین) در مدت زمان‌های مشخص (۱۰-۲ دقیقه) بر اساس طرح مرکب مرکزی[2] با ماکزیمم دور (۵۴۰۰ دور در دقیقه) در دمای محیط هم‌زده شد (Mott *et al*., 1997).

ارزیابی ویژگی‌های کف

اندازه‌گیری دانسیته کف

دانسیته کف با استفاده از استوانه مدرج و توزین ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه کف در دمای محیط (۲۵-۲۲ درجه سانتی‌گراد) مطابق با روش Bag و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد. جهت جلوگیری از تخریب ساختار کف و نیز ممانعت از ایجاد حفره هوا درون استوانه مدرج، انتقال کف به درون استوانه با دقت انجام شد. به‌منظور جلوگیری از خطا، اندازه‌گیری با ۳ تکرار انجام شد و میانگین مقادیر گزارش داده شد. دانسیته کف آب کرفس به صورت جرم بر واحد حجم با واحد gr/cm^3 بیان شد.

اندازه‌گیری پایداری کف

به‌منظور تعیین پایداری کف، آزمون میزان مایع جدا شده (حجم زهکشی) از کف مبتنی بر روش بیان شده توسط Bag و همکاران (۲۰۱۱) همراه با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت. در روش اصلاح شده، ۵۰ گرم از نمونه کف به درون قیف بوخنر با قطر ۸۰ میلی‌متر که با صافی توری با مش ۴۰ پوشانده شده بود و بر روی استوانه مدرج با حجم ۲۵ میلی‌متر قرار داشت، ریخته شد. پس از گذشت یک ساعت، مقدار مایع جدا شده از نمونه کف در اثر نیروی جاذبه در دمای محیط (۲۵-۲۲ درجه سانتی‌گراد) که درون استوانه مدرج جمع شده بود، به‌عنوان حجم زهکشی بر حسب میلی‌لیتر بیان شد.

1 Tapped density

2 Central Composite Design

بررسی ویژگی‌های پودر آب کرفس

اندازه‌گیری محتوای رطوبتی و فعالیت آب

میزان رطوبت پودرهای کرفس با استفاده از روش خشک کردن با آون تعیین شد. نمونه‌های پودر در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت خشک شدند. محتوای رطوبتی از روی اختلاف وزن بین پودرها قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن بر حسب ماده خشک محاسبه شد (AOAC, 1984).

برای اندازه‌گیری فعالیت آب از دستگاه a_wمتر (Rotronic Hygrolab2، سوئیس) استفاده شد. برای این منظور مقداری از پودر در ظرف مخصوص دستگاه ریخته شد و پس از برقراری تعادل، میزان فعالیت آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت شد.

دانسیته توده‌ای و دانسیته ضربه‌ای

به‌منظور تعیین دانسیته توده مقداری از پودر درون استوانه شیشه‌ای ریخته شد، سپس از طریق وارد کردن ضربه از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری با استفاده از یک صفحه پلاستیکی، حجم نهایی پودر خوانده شد، دانسیته ضربه‌ای از طریق نسبت جرم پودر به حجم نهایی بر حسب gr/cm^3 محاسبه شد (Jinapong *et al*., 2008).

دانسیته ذره‌ای

به‌منظور اندازه‌گیری دانسیته ذره ۱ گرم پودر با ۵ میلی‌لیتر پترولیوم اتر درون استوانه ۱۰ میلی‌لیتری مخلوط شد. پس از تکان دادن کامل ذرات پودر معلق شده و ۱ میلی‌لیتر پترولیوم اتر برای جدا کردن پودر از بدنه استوانه شیشه‌ای استفاده شد. حجم پترولیوم اتر استفاده شده برابر با ۶ میلی‌لیتر بوده (V_{pe}) و با محاسبه حجم نهایی پودر معلق شده در پترولیوم اتر (V_t) دانسیته ذره از رابطه (۱) بر حسب واحد gr/cm^3 محاسبه شد (Jinapong *et al*., 2008).

$$P_p = \frac{m}{V_t - V_{pe}} \qquad (۱)$$

تخلخل

تخلخل به‌صورت حجم خلل و فرج درون ذرات به حجم کل آن تعریف می‌شود. تخلخل نمونه‌های پودر از رابطه ۲ زیر محاسبه شد (Jinapong *et al*., 2008).

$$\text{تخلخل} = \frac{\text{دانسیته متراکم} - \text{دانسیته ذره}}{\text{دانسیته ذره}} \times 100 \qquad (۲)$$

پیوستگی

پیوستگی پودرها با نسبت هاسنر[1] (HR) قابل محاسبه است. پیوستگی پودرها از طریق تقسیم دانسیته متراکم به دانسیته توده رابطه ۳ محاسبه می‌گردد (Hausner *et al*., 1976). طبقه‌بندی پیوستگی پودرها بر اساس نسبت هاسنر در جدول ۱آورده شده است.

$$\text{نسبت هاسنر} = \frac{\text{دانسیته متراکم}}{\text{دانسیته توده}} \qquad (۳)$$

جدول ۱- طبقه بندی پیوستگی پودرها بر اساس نسبت هاسنر

HR	پیوستگی
<۱/۲	کم
۱/۲-۱/۴	متوسط
>۱/۴	زیاد

قابلیت جریان

قابلیت جریان‌پذیری پودرها از طریق اندیس Car (CI) قابل محاسبه است. اندیس Car از طریق رابطه (۴) محاسبه شد (Carr, 1965). طبقه‌بندی قابلیت جریان پودرها بر اساس اندیس Car در جدول ۲ آورده شده است.

$$\text{شاخص کار} = \frac{\text{دانسیته توده} - \text{دانسیته متراکم}}{\text{دانسیته متراکم}} \times 100 \qquad (۴)$$

جدول۲- طبقه‌بندی قابلیت جریان پودرها بر اساس شاخص Car

CI%	قابلیت جریان
<۱۵	خیلی خوب
۱۵-۲۰	خوب
۲۰-۳۵	نسبتاً خوب
۳۵-۴۵	بد
>۴۵	خیلی بد

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

طراحی آزمایش، تحلیل نتایج و تعیین شرایط بهینه تولید کف با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۰،۰،۰۷ انجام گرفت. در این پژوهش، از طرح مرکب مرکزی متمرکز شده با سه متغیر مستقل در سه سطح و شش تکرار در نقطه مرکزی طرح استفاده شد؛ به‌طوری که مجموع کل تیمارها ۲۰ عدد بود. متغیرهای مستقل صمغ زانتان، کنسانتره پروتئین آب پنیر و زمان هم زدن بود. همچنین متغیرهای وابسته (پاسخ‌ها) شامل دانسیته کف و پایداری کف بودند. این طرح آزمایشی شامل سه سطح فاکتور کدبندی بود؛ به‌طوری که سطح پایین هر فاکتور (۱-) به‌عنوان کمینه، سطح میانی هر فاکتور با (۰) و سطح بالای هر فاکتور به‌عنوان بیشینه و به صورت (۱+) مشخص شد. محدوده آزمایش‌ها بر پایه نتایج به‌دست آمده از پیش تیمارها انتخاب شد که بر این اساس مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۴۵

1 Hausner ratio

درصد صمغ زانتان، مقادیر ۲ تا ۶ گرم کنسانتره پروتئین آب پنیر و ۲ تا ۱۰ دقیقه زمان هم‌زدن تعیین شد. کیفیت و صحت مدل رگرسیونی و مناسب بودن برازش صورت گرفته به‌وسیله آنالیز مدل، ضعف برازش و ضریب مشخص شد (Kaur *et al.*, 2009). ویژگی‌های پودر تولید شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تیمار و ۳ تکرار مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز واریانس با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام شد و از آزمون دانکن برای مقایسه میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد ($p<۰/۰۵$).

نتایج و بحث

خواص فیزیکی مربوط به کف

نتایج به دست آمده از طرح آزمایشی مورد استفاده به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف آب کرفس در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز واریانس، مدل چندجمله‌ای درجه دوم به‌عنوان بهترین مدل برای بررسی اثر متغیرهای مستقل بر خصوصیات دانسیته و پایداری کف پیشنهاد گردید. خلاصه نتایج تجزیه مدل‌ها جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ عدم معنی‌داری آزمون ضعف برازش، در مدل چندجمله‌ای پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار برای پاسخ‌ها را نشان می‌دهد، همچنین بالا بودن مقدار ضریب تعیین ($R^۲$)، $R^۲_{adjusted}$ و $R^۲_{predicted}$ که در جدول ۵ نشان داده شده است می‌توان بیان کرد که این مدل قدرت بالایی در برازش داده‌های آزمون دارد.

جدول ۳- نتایج طرح آزمایشی مورد استفاده به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف آب کرفس

ردیف	متغیرهای مستقل			متغیرهای وابسته	
	صمغ زانتان (g/۱۰۰g)	کنسانتره پروتئین آب پنیر (g/۱۰۰g)	زمان هم‌زدن (min)	دانسیته (gr/cm³)	حجم زهکشی (ml)
۱	۰/۳ ۵(۰)	۶ (+۱)	۶ (۰)	۰/۴ ±۰/۰۲۶	۲/۵ ± ۰/۵
۲	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۲ ± ۰/۰۴۳	۴± ۱
۳	۰/۲۵ (−۱)	۲ (−۱)	۱۰ (+۱)	۰/۳۹ ± ۰/۰۱۷	۱۳/۵± ۰/۵
٤	۰/۲۵ (−۱)	۶ (+۱)	۲ (−۱)	۰/۴۴ ± ۰/۰۳۵	۲۰ ± ۱
٥	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۳ ± ۰/۰۲	۵/۱ ±۰/۶
٦	۰/۲۵ (−۱)	۶ (+۱)	۱۰ (+۱)	۰/۳۸ ± ۰/۰۴۳	۱۱± ۲/۶
۷	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۱۰ (+۱)	۰/۴± ۰/۰۶۲	۳/۵ ± ۱/۳
۸	۰/۳۵ (۰)	۲ (−۱)	۶ (۰)	۰/۴۵± ۰/۰۴۴	۸/۵ ± ۰/۵
۹	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۲ (−۱)	۰/۴۷± ۰/۰۲۶	۹ ± ۱
۱۰	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۳± ۰/۰۲۶	۵/۲ ± ۰/۷
۱۱	۰/۲۵ (−۱)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۱ ± ۰/۰۲	۱۴ ± ۱
۱۲	۰/۴۵ (+۱)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۴ ± ۰/۰۲۶	۰ ± ۰
۱۳	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۳± ۰/۰۶۵	۶ ± ۲/۶
١٤	۰/۴۵ (+۱)	۶ (+۱)	۲ (−۱)	۰/۴۸± ۰/۰۴۳	./۲۵ ±۰/۲
١٥	۰/۴۵ (+۱)	۲ (−۱)	۱۰ (+۱)	۰/۴۲± ۰/۰۵۵	۰ ± ۰
١٦	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۳± ۰/۰۳۶	۴/۵ ± ۰/۵
۱۷	۰/۳۵ (۰)	۴ (۰)	۶ (۰)	۰/۴۳± ۰/۰۳۶	۵/۵ ± ۰/۵
۱۸	۰/۲۵ (−۱)	۲ (−۱)	۲ (−۱)	۰/۴۹ ± ۰/۰۳۶	۲۶ ± ۱/۷
۱۹	۰/۴۵ (+۱)	۶ (+۱)	۱۰ (+۱)	۰/۴ ±۰/۰۵۶	۰ ± ۰
۲۰	۰/۴۵ (+۱)	۲ (−۱)	۲ (−۱)	۰/۵۴ ± ۰/۰۷۲	۶/۵ ± ۱/۳

جدول ٤- خلاصه نتایج تجزیه مدل‌ها به‌منظور انتخاب مدل مناسب برای پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

منبع	درجه آزادی	دانسیته کف (gr/cm^{۳}) مجموع مربعات	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F	حجم زهکشی (ml) مجموع مربعات	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F
میانگین	۱	۳/۷۷	۳/۷۷	---	---	۱۰۵۱/۹۸	۱۰۵۱/۹۸	---	---
خطی	۳	۰/۰۲۵	۸/۳۳×۱۰$^{-۳}$	۵۳/۵۳	<۰/۰۰۰۱	۷۶۱/۴۷	۲۵۳/۸۲	۳۰/۹۰	<۰/۰۰۰۱
2FI	۳	۱/۰۵×۱۰$^{-۳}$	۳/۵×۱۰$^{-۴}$	۳/۱۶	۰/۰۶۰۹	۳۹/۷۱	۱۳/۲۴	۱/۸۸	۰/۱۸۳۴
چندجمله‌ای	**۳**	**۱/۰۰۹×۱۰$^{-۳}$**	**۳/۳٦٤×۱۰$^{-٤}$**	**۷/۸۱**	**۰/۰۰٥٦**	**۸۳/۱۷**	**۲۷/۷۲**	**۳۲/٤٦**	**<۰/۰۰۰۱**
مکعبی	۴	۲/۶×۱۰$^{-۴}$	۶/۵×۱۰$^{-۵}$	۲/۲۸	۰/۱۷۵۳	۵/۵۶	۱/۳۹	۲/۸	۰/۱۲۵۲
باقیمانده	۶	۱/۷۱×۱۰$^{-۴}$	۲/۸۵×۱۰$^{-۵}$	---	---	۲/۹۸	۰/۵۰	---	---
کل	۲۰	۳/۷۹	۰/۱۹	---	---	۱۹۴۴/۸۶	۹۷/۲۴	---	---
	آزمون ضعف برازش								
خطی	۱۱	۲/۴۰۷×۱۰$^{-۳}$	۲/۱۸×۱۰$^{-۴}$	۱۳/۱۳	۰/۰۰۵۳	۱۲۸/۸۸	۱۱/۷۲	۲۳/۱۱	۰/۰۰۱۴
2FI	۸	۱/۳۵۷×۱۰$^{-۳}$	۱/۶۹×۱۰$^{-۴}$	۱۰/۱۸	۰/۰۱۰۳	۸۹/۱۷	۱۱/۱۵	۲۱/۹۹	۰/۰۰۱۷
چندجمله‌ای	**٥**	**۳/٤۷٦×۱۰$^{-٤}$**	**٦/۹٥×۱۰$^{-٥}$**	**٤/۱۷**	**۰/۰۷۱٦**	**٦/۰۰**	**۱/۲۰**	**۲/۳۷**	**۰/۱۸۲۹**
مکعبی	۱	۸/۷۶×۱۰$^{-۵}$	۸/۷۶×۱۰$^{-۵}$	۲/۲۵	۰/۰۷۰۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۸۷	۰/۳۹۳۴
خطا	۵	۸/۳۳×۱۰$^{-۵}$	۱/۶۷×۱۰$^{-۵}$	---	---	۲/۵۴	۰/۵۱	---	---

جدول ۵- نتایج آماری مدل چندجمله‌ای درجه دوم بر داده‌های پاسخ

پاسخ	میانگین	انحراف معیار (SD)	ضریب تغییرات (CV)	$R^{۲}$	$R^{۲}_{adjusted}$	$R^{۲}_{predicted}$
دانسیته	۰/۴۳	۰/۰۰۶	۱/۵۱	۰/۹۸۴۳	۰/۹۷۰۲	۰/۹۰۹۴
حجم زهکشی	۷/۲۵	۰/۹۲	۱۲/۴۷	۰/۹۹۰۴	۰/۹۸۱۸	۰/۹۲۹۴

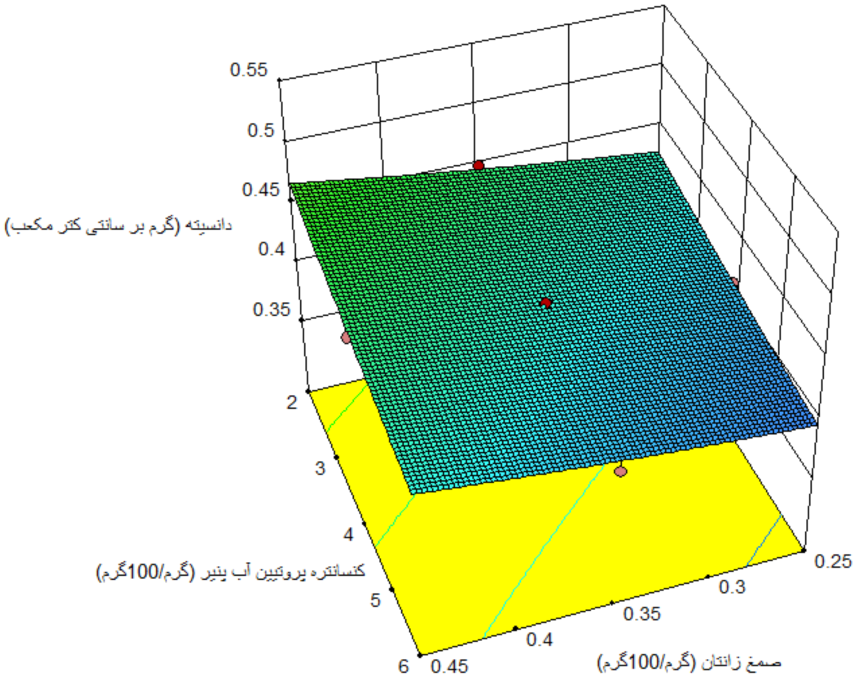
تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ‌ها

دانسیته کف

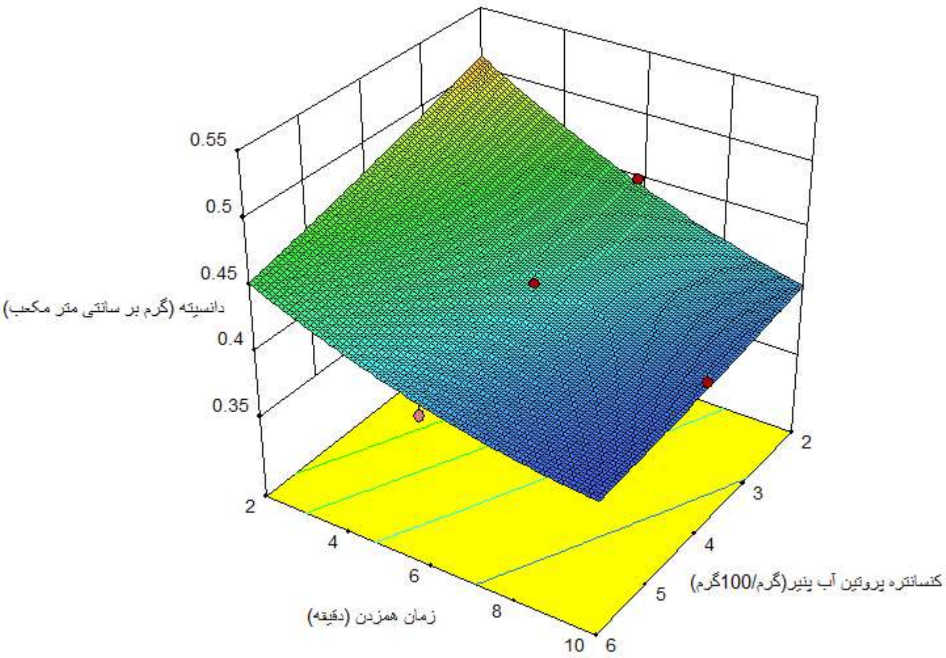
یکی از پارامترهای مهم در سیستم‌های کفی مقدار دانسیته است. مقدار بالای هوای محبوس شده طی هم‌زدن منجر به انبساط کف می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت کف‌زایی است. دانسیته کف معمولاً برای ارزیابی خصوصیات کف استفاده می‌شود؛ هرچه هوای بیشتری به داخل مایع وارد شود، دانسیته کف کاهش پیدا می‌کند. هوای زیاد در کف نشانه قابلیت بالای هم‌زدن آن است (Bag *et al.*, 2011؛ Falade *et al.*, 2010). مقدار دانسیته نمونه‌های کف آب کرفس بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود (جدول ۳). صمغ زانتان، کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و زمان هم‌زدن به صورت خطی اثر معنی‌داری روی دانسیته کف داشتند (p<۰/۰۱). همچنین اثر متقابل کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و زمان هم‌زدن (p<۰/۰۱) و اثر درجه دوم زمان هم‌زدن (p<۰/۰۵) معنی‌دار بود.

تغییر دانسیته کف با میزان صمغ زانتان، کنسانتره پروتئین آب پنیر و زمان هم‌زدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان کنسانتره پروتئین آب پنیر از ۲ به ۶ درصد مقدار دانسیته کف به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است. توانایی ایجاد کف تحت تأثیر اندازه مولکولی و ساختار پروتئین است. پروتئین‌های کوچک و انعطاف پذیر مانند پروتئین‌های آب پنیر قابلیت کف زایی بیشتری دارند و سریع‌تر و آسان‌تر کشش بین سطحی را کاهش می‌دهند و سبب کاهش دانسیته می‌شوند (Dickinson *et al.*, 1982).



شکل ۱- نمودار سطح پاسخ دانسیته کف- تأثیر صمغ زانتان و کنسانتره پروتئین آب پنیر



شکل ۲- نمودار سطح پاسخ دانسیته کف- تأثیر کنسانتره پروتئین آب پنیر و زمان هم‌زدن

افزایش میزان صمغ زانتان اثر نامطلوبی روی انبساط کف داشت و سبب افزایش دانسیته کف شد. هنگامی‌که صمغ زانتان به یک مایع اضافه می‌شود، سبب افزایش ویسکوزیته آن می‌گردد. این افزایش ویسکوزیته مانع از ورود هوا شده و میزان هوای محبوس شده در مخلوط

را کاهش می‌دهد، از این رو موجب کاهش انبساط و در نتیجه افزایش دانسیته کف می‌شود (Bikerman, 1999). مشابه این نتایج توسط Bag و همکاران (۲۰۱۱)، عزیزپور (۱۳۹۱) و صلاحی (۱۳۹۴) به‌ترتیب برای تولید کف پالپ میوه Bael و میگو و طالبی گزارش شده است.

همان‌طور که از شکل ۲ مشاهده می‌کنیم افزایش زمان هم‌زدن سبب کاهش دانسیته کف شد. با افزایش زمان هم‌زدن، دانسیته نمونه‌ها به علت ورود هوای بیشتر به درون سیستم‌های کف و به دام افتادن درون سیستم به صورت حباب کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش زمان هم‌زدن می‌تواند به دلیل افزایش میزان دناتوراسیون پروتئین‌ها و کاهش کشش سطحی و افزایش احتمالی گروه‌های آب‌دوست در سطح به دنبال سبب کاهش دانسیته کف شود (Raharitsifa *et al*., 2006).

همچنین افزایش درصد کنسانتره پروتئین آب‌پنیر در زمان‌های طولانی هم‌زدن، به دلیل افزایش دناتوراسیون پروتئین‌های بیشتر، دانسیته کف را بیشتر کاهش داده است. نتایج مشابهی نیز توسط لعل سجادی و همکاران (۱۳۹۶)، Faladeh و همکاران (۲۰۰۳)، Sankat و همکاران (۲۰۰۴) به‌ترتیب درباره اثر آلبومین تخم‌مرغ بر کاهش دانسیته کف خامه، کف نخودفرنگی و موز گزارش شده است. طبق پژوهش‌های انجام شده، دانسیته کف در بازه ۰/۳ تا ۰/۶ به‌عنوان دانسیته مناسب برای خشک کردن کف‌پوشی گزارش شده است (Kurda *et al*., 2006).

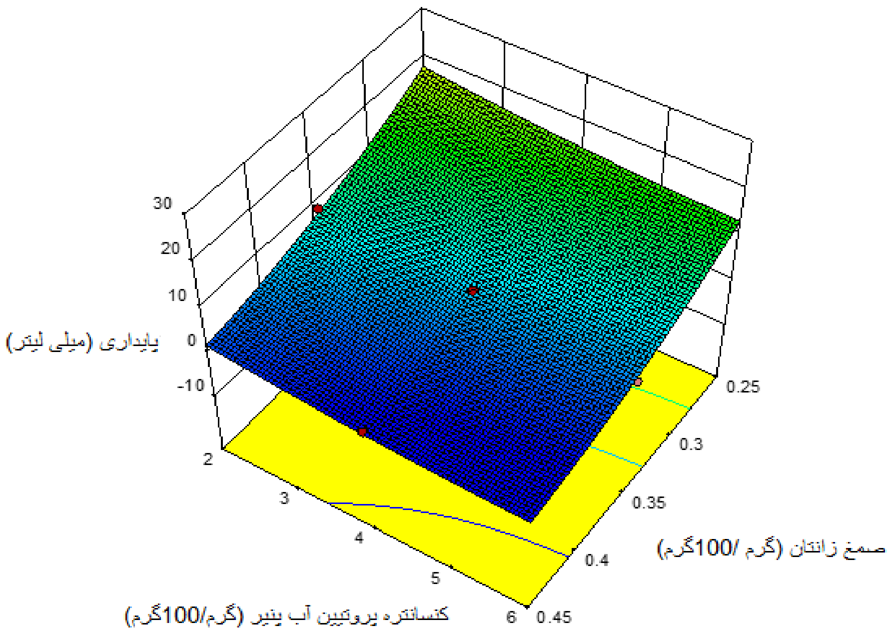
پایداری کف

تعیین پایداری کف یک مرحله کلیدی و مهم در مطالعه خواص کف است که معمولاً با اندازه‌گیری میزان مایع جدا شده (زهکشی) از کف طی مدت زمان مشخص تعیین می‌شود. اگر ساختار کف شکسته شود، زمان خشک‌کردن افزایش می‌یابد و کیفیت فرآورده کم می‌شود (Hart, 1963). پایداری کف به‌وسیله خواص فیزیکی و رئولوژیکی در فصل مشترک هوا- مایع و فاز پیوسته تحت تأثیر قرار می‌گیرد. خصوصیات فصل مشترک، توزیع اندازه حباب‌های کف، نفوذپذیری سطح مشترک و کشش سطحی بر میزان حجم زهکشی مؤثر هستند. جریان مایع از میان ساختار کف ناشی از نیروی‌های موئینگی یا نیروهای خارجی نظیر نیروی ثقل است که در نتیجه نازک شدن و از هم گسیختگی دیواره حباب رخ می‌دهد (Muthukumaran, 2007).

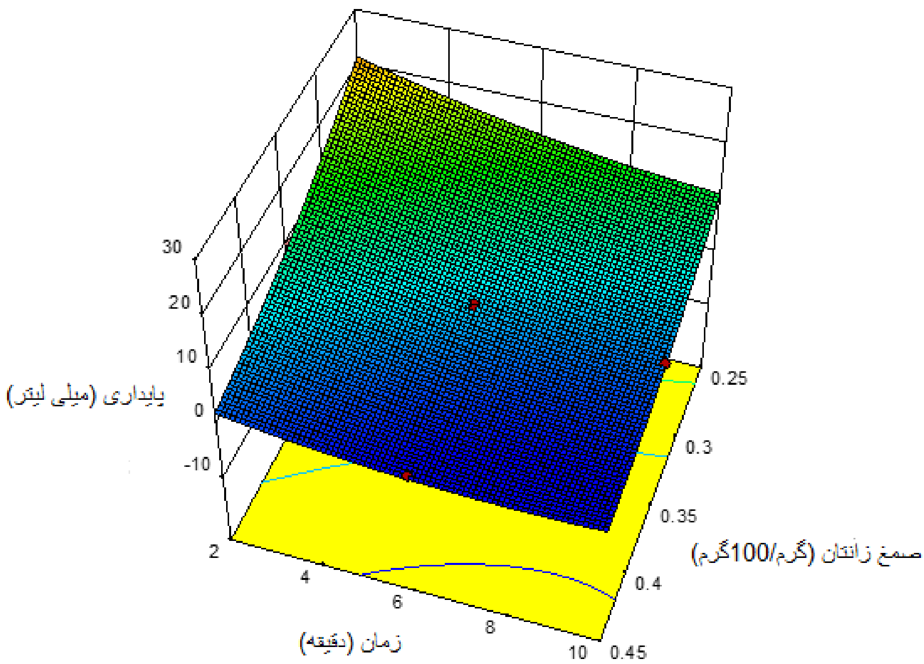
مقدار حجم زهکشی نمونه‌های کف آب کرفس بین ۰ تا ۲۶ میلی‌لیتر متغیر بود (جدول ۳). تغییر پایداری کف با میزان صمغ زانتان، کنسانتره پروتئین آب پنیر و زمان هم‌زدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد غلظت صمغ زانتان و مقدار کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و زمان هم‌زدن اثر معنی‌دار ($p<0/01$) و خطی بر مقدار مایع جدا شده از کف داشتند. همچنین اثر متقابل میزان صمغ زانتان و زمان هم‌زدن و اثر متقابل مقدار کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و زمان هم‌زدن و اثر درجه دومی صمغ زانتان نیز معنی‌دار ($p<0/01$) بود. همان طور که از در شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود صمغ زانتان نقش اساسی و مهم در پایداری کف دارد ($p<0/01$). افزایش میزان صمغ سبب افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و خاصیت ویسکوالاستیکی و ارتجاعی لاملا می‌شود که در این حالت مقاومت دیواره حباب بیشتر شده، منجر به افزایش استحکام ساختار کف و ممانعت از فروپاشی حباب‌ها می‌شود (Papalampour *et al*., 2005). Prins (۱۹۸۸) بیان کرد که افزایش ویسکوزیته فاز مایع سبب ایجاد ساختار شبکه‌ای در فاز پیوسته می‌شود؛ به‌طوری که دیواره فصل مشترک را از شکسته شدن حفظ می‌کند و باعث بهبود پایداری کف می‌شود. نتایج مشابهی توسط Bag و همکاران (۲۰۱۱)، عزیزپور (۱۳۹۱)، پاسبان (۱۳۹۱) و عطاردی (۱۳۹۳) به ترتیب در بررسی پایداری کف‌های پالپ میوه Bael، میگو، قارچ دکمه‌ای و ریز جلبک اسپیرولینا گزارش شده است.

افزایش میزان کنسانتره پروتئین آب پنیر از ۲ به ۶ درصد سبب کاهش میزان حجم زهکشی شد ($p<0/01$). افزایش عامل کف‌زا سبب افزایش ویسکوزیته و تنش تسلیم فاز پیوسته و به عبارت دیگر ضخیم‌تر شدن و افزایش مقاومت فیلم‌های جذب در فصل مشترک هوا-آب و استحکام لایه مرزی (با ایجاد برهمکنش با لاملا با نیروهای الکترواستاتیک، هیدروژنی، کووالانسی و هیدروفوبی) می‌شود (Dickinson و همکاران،۱۹۸۷; Carp و همکاران،۱۹۹۷; Karim و همکاران، ۱۹۹۹؛ Vernon و همکاران،۲۰۰۱). کنسانتره پروتئین آب‌پنیر به علت داشتن پروتئین از عوامل پایدارکننده کف به‌شمار می‌رود، به‌طوری که وایلد و کلارک (۱۹۹۶)، آلئونی و همکاران (۲۰۰۴) عوامل موثر در پایداری کف در مواد پروتئین‌دار را غلظت پروتئین، دما، برهمکنش بین مولکولی، نمک و ویسکوالاستیسیته سطح دانسته‌اند و اظهار داشتند که وجود پروتئین در سطح مشترک هوا–مایع تنش سطح را کاهش داده، منجر به پایداری کف می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش زمان همزدن نیز سبب افزایش پایداری کف شد ($p<0/05$). افزایش زمان همزدن سبب دناتوره شدن بیشتر پروتئین‌های سفیده تخم‌مرغ و افزایش گروه‌های آبدوست در سطح و در نتیجه افزایش پایداری کف می‌گردد. نتایج مشابه‌ای توسط راهاریتسیفا و همکاران (۲۰۰۶) و عطاردی (۱۳۹۳) و صلاحی (۱۳۹۴) گزارش شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌کنیم افزایش میزان صمغ زانتان در زمان‌های طولانی هم‌زدن سبب افزایش میزان پایداری شد. پاسبان و همکاران (۱۳۹۱) گزارش کردند، بهبود خواص رئولوژیکی فاز آبی متاثر از افزایش غلظت صمغ موجب افزایش پایداری کف در زمان‌های بالای هم‌زدن می‌گردد (فالاده و همکاران،۲۰۰۳;بگ و همکاران ۲۰۱۱). در این پژوهش، هدف از بهینه‌سازی، تولید کف آب کرفس با حداقل میزان دانسیته و حجم زهکشی بود. بر این اساس شرایط بهینه جهت تولید کف آب کرفس با کمترین میزان دانسیته و کمترین میزان حجم زهکشی در غلظت صمغ زانتان ۰/۴۲ درصد، مقدار کنسانتره پروتئین آب پنیر ۶ درصد و زمان هم زدن ۹/۳۰ دقیقه تعیین گردید. در

این شرایط مقادیر دانسیته و پایداری کف اندازه‌گیری شد که به‌ترتیب ۰/۰۰۸±۰/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰±۰ میلی‌لیتر بودند.



شکل ۳- نمودار سطح پاسخ پایداری کف- تأثیر صمغ زانتان و کنسانتره پروتئین آب پنیر



شکل٤- نمودار سطح پاسخ بر پایداری کف- تأثیرات صمغ زانتان و زمان هم زدن

بررسی ویژگی‌های پودر حاصل از آب کرفس

میزان رطوبت و فعالیت آب

محتوای رطوبت نمونه‌های پودرهای کرفس تولید شده به روش خشک کردن کف‌پوشی در دماهای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد بین ۳/۲ درصد تا ۵/۸۶ درصد بود (جدول ۶). با افزایش دمای خشک‌کردن اختلاف دمایی میان کف و هوای خشک‌کننده بیشتر شده و سرعت انتقال حرارت در ذرات بیشتر خواهد شد که در نتیجه نیروی محرکی برای حذف رطوبت ایجاد می‌شود، بنابراین نیروی بیشتری جهت تبخیر آب اعمال می‌گردد و در نتیجه پودر با حداقل میزان رطوبت تولید شد (فضایلی و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین با افزایش دما، رطوبت نسبی هوا کم شده، در نتیجه درصد رطوبت نهایی محصول کاهش می‌یابد. به‌علاوه در دماهای بالاتر به دلیل دناتوره شدن پروتئین نمونه‌ها، ساختار پروتئین تغییر کرده، توانایی نگهداری آب توسط پروتئین‌ها کم می‌شود (Fennema, 1996). نتایج مشابهی توسط Kolawole و همکاران (۲۰۱۰)، Kadam و همکاران (۲۰۱۱)، عزیزپور (۱۳۹۱)، صلاحی (۱۳۹۴) به ترتیب برای خشک‌کردن کف‌پوشی موز، آب گوجه‌فرنگی، میگو و پالپ طالبی گزارش شده است. اثر دمای خشک‌کردن بر فعالیت آبی با اثر دما روی محتوای رطوبتی سازگاری داشت. محدوده فعالیت آب پودرها بین ۰/۱۲۳ تا ۰/۱۷۵ بود. به‌طور کلی در دماهای بالاتر خشک‌کردن، پودرهایی با فعالیت آب کمتر ایجاد می‌شود. مواد غذایی که میزان فعالیت آبی آن‌ها کمتر از ۰/۶ است، از نظر میکروبی پایدار هستند (صلاحی، ۱۳۹۴). نتایج مشابهی توسط عزیزپور (۱۳۹۱) و صلاحی (۱۳۹۴) در خشک‌کردن کف پوشی میگو و پالپ طالبی گزارش شده‌است.

جدول ٦- مقادیر برخی از ویژگی‌های پودر آب کرفس در دماهای مختلف خشک‌کردن

دمای خشک شدن (°C)	رطوبت (g/۱۰۰g)	فعالیت آبی (a_w)	دانسیته توده (gr/cm۳)	دانسیته ضربه (gr/cm۳)
٤٠	۵/۸۶±۰/۰۶[a]	۰/۱۷۵±۰[a]	۰/۵±۰[a]	۰/۶۶±۰[a]
٥٥	۴/۲۳±۰/۱۳[b]	۰/۱۶۲±۰[b]	۰/۴۶±۰/۰۱[b]	۰/۵۸±۰/۰۱[b]
۷۰	۳/۲±۰/۲۶[c]	۰/۱۲۳±۰[c]	۰/۳۹±۰/۰۱[c]	۰/۴۶±۰/۰۱[c]

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است ($p>۰/۰۵$).

دانسیته توده

مقدار دانسیته توده در این مطالعه در محدوده ۰/۳۹ تا ۰/۵ گرم بر میلی‌لیتر مکعب گزارش شد. افزایش دانسیته موجب کاهش حجم محصول می‌شود. دانسیته پارامتر مهمی است که بر خواص عملکردی پودر تأثیر می‌گذارد. دانسیته توده به‌صورت وزن پودر (گرم) در واحد حجم (میلی‌لیتر) بیان می‌شود که می‌تواند تحت تأثیر محتوای رطوبت، اندازه ذرات و شکل ذرات باشد (Horuz *et al*., 2012) و (خلیلیان و همکاران،۱۳۹۲). دانسیته توده به‌صورت مستقیم با سهولت بازسازی، بسته‌بندی، حمل و نقل و بازاریابی مواد غذایی پودری در ارتباط است. محصول خشک‌شده با دانسیته توده بالا در مقایسه با محصولاتی با دانسیته توده کمتر می‌تواند در ظروف کوچک‌تر ذخیره گردد (جعفریان و همکاران، ۱۳۹۶، Feranco *et al*, 2016). همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود با افزایش دمای خشک‌کردن، دانسیته توده پودر، کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دمای خشک کردن، سرعت تبخیر رطوبت افزایش یافته و رطوبت کاهش یافته، اندازه ذرات بزرگ‌تر شده و ذرات کروی‌تر با فشردگی و چروکیدگی سطحی کمتر تولید می‌شوند (پیغمبر دوست و همکاران، ۱۳۹۴). تأثیر دما بر دانسیته توده به تأثیر آن بر میزان رطوبت نیز بستگی دارد. هرچه میزان رطوبت محصول بالاتر باشد، دانسیته توده آن به دلیل حضور آب بیشتر است. چگینی و قبادیان (۲۰۰۵) در بررسی تأثیر دما بر خواص فیزیکی پودر آب پرتغال تولید شده به‌روش پاششی و Asokapandian و همکاران (۲۰۱۵) در خشک‌کردن خربزه به روش کف‌پوشی و همچنین پیغمبر دوست و همکاران (۱۳۹۴) در ارزیابی دمای هوا بر خواص فیزیکی پودر عصاره مالت نتایج مشابه گزارش کردند.

دانسیته ضربه

دانسیته توده ضربه‌ای در محدوده بین ۰/۴۶ تا ۰/۶۶ گرم بر میلی‌متر مکعب بود (جدول ۶). تأثیر دما بر دانسیته ضربه معنی‌دار مشاهده شد. روند و علت تغییرات دانسیته ضربه‌ای نسبت به تغییرات دما مشابه دانسیته توده‌ای است. دانسیته ضربه عموماً بیشتر از دانسیته توده است؛ زیرا با وارد شدن ضربه یا تکان دادن، فضای خالی بین ذرات پر شده و حجم اشغال شده توسط پودر کاهش می‌یابد (Goula *et al*., 2005). نتایج مشابهی توسط خرازپور و همکاران (۱۳۹۴) در خشک کردن کف‌پوشی آبغوره نیز گزارش شده است.

دانسیته ذره و تخلخل

طبق جدول ۷ در اثر افزایش دمای خشک‌کردن، دانسیته ذره کاهش یافته است که فقط در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد معنادار است.

دانسیته ذره در پودر حاصل از خشک‌کردن کف‌پوشی آب کرفس در محدوده ۱/۵ تا ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود و تفاوت معناداری نیز در مقادیر دانسیته ذره مشاهده نشد. دانسیته ذره بیانگر حضور حفره‌های داخلی در ذرات مواد غذایی است. این چگالی، نسبت جرم واقعی ذرات به حجم واقعی آن‌ها است (مرتضوی و همکاران، ۱۳۸۴). دانسیته ذره باید تا حد امکان بالا باشد تا قابلیت ته‌نشینی پودر بهبود یابد (فرشادفر، ۱۳۸۵). خرازپور و همکاران (۱۳۹۴) در خشک کردن کف‌پوشی آبغوره به نتایج مشابهی نیز دست یافتند.

تخلخل پودرهای تولید شده در محدود بین ۶۲ تا ۶۹ درصد گزارش شد. به‌صورت کلی با افزایش دمای خشک‌کردن و کاهش یافتن رطوبت پودرها، امکان نزدیک شدن و به هم چسبیدن ذرات پودر و در نتیجه پر شدن فضاهای خالی بین آن‌ها کمتر می‌شود و در نتیجه تخلخل افزایش یافت (Koc *et al*., 2008). این نتایج مطابق یافته‌های Guola (۲۰۰۵) در تولید پودر پاشش گوجه‌فرنگی و Jinapong و همکاران (۲۰۰۸) در تولید پودر شیر سویا و خرازپور (۱۳۹۴) در تولید پودر آبغوره به‌روش کف‌پوشی است.

تخلخل درواقع فضاهای خالی موجود در ماده را نشان می‌دهد و بیانگر حجم اشغال نشده توسط ماده جامد است. تخلخل به عواملی چون دانسیته توده، ترکیب شیمیایی ماده، رطوبت، دما و سایر شرایط فرایند خشک‌کردن بستگی دارد (Barbosa-Canovas *et al*., 2005).

علت بالاتر بودن تخلخل پودر حاصل از خشک‌کردن کف‌پوشی را به ساختار متخلخل کف می‌توان نسبت داد. محصولات خشک‌شده به روش پاششی به شکل کره میان‌تهی است که دیواره ضخیمی از ماده خشک پیرامون آن را فراگرفته است اما محصولات به‌دست آمده از فرآیند تولید کف دارای فضای درونی گسترده و دیواره‌های نسبتاً نازکی است (Holdsworth, 1985).

جدول ۷- مقادیر برخی از ویژگی‌های پودر آب کرفس در دماهای مختلف خشک‌کردن

دمای خشک شدن (°C)	دانسیته ذره (gr/ml^3)	تخلخل (٪)	نسبت هاسنر	شاخص کار
۴۰	$۱/۷۸\pm۰/۰۷^{a}$	$۶۲\pm۰/۱^{a}$	$۱/۳۲\pm۰/۰۱^{a}$	$۲۴/۶۷\pm۰/۸^{a}$
۵۵	$۱/۵۶\pm۰/۰۵^{b}$	$۶۳\pm۰/۵۷^{a}$	$۱/۲۷\pm۰/۰۲^{a}$	$۲۰/۶۳\pm۲/۸۷^{b}$
۷۰	$۱/۵\pm۰/۰۳^{b}$	$۶۹\pm۰/۵۷^{b}$	$۱/۱۵\pm۰/۰۵^{b}$	$۱۵/۲\pm۰/۳۳^{c}$

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار است ($p>۰/۰۵$).

پیوستگی

در این مطالعه، پیوستگی پودرها با محاسبه نسبت هاسنر صورت گرفت. مقدار عددی نسبت هاسنر در این تحقیق در محدوده ۱/۱۵ تا ۱/۳۲ بود (جدول ۷). پیوستگی خاصیت درونی پودر و مربوط به نیروهای بین مولکولی است که ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد. وقتی ذرات به هم برخورد می‌کنند به یکدیگر چسبیده و توده‌ای می‌شوند، مگر این که با نیرویی بیش از نیروی پیوستگی‌شان شکسته شوند (Bhandari *et al*., 1999). جدول ۷ نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای خشک‌کردن، به‌طور معنی‌داری پیوستگی پودرها را از ۱/۳۲ به ۱/۱۵ کاهش داده است. رطوبت و سطح تماس از عوامل مؤثر در میزان پیوستگی هستند. (Jinapong *et al*., 2008). در واقع با افزایش درجه حرارت خشک‌کردن، رطوبت کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه تشکیل پل‌های مایع بین ذرات کمتر می‌شود و این امر باعث کاهش پیوستگی پودرها شد. کلانتری در خشک کردن کف پوشی عصاره انجیر (۱۳۹۰)، و صالحی (۱۳۹۰) در تولید پودر نارنج، خرازپور و همکاران (۱۳۹۴) در خشک‌کردن کف‌پوشی آبغوره و ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) در خشک‌کردن پاششی ژل آلوورا نتایج مشابهی گزارش کردند. رفتار چسبناکی و جاذب‌الرطوبه بودن پودر آب میوه‌ها به میزان قند به خصوص قندهای ساده با وزن مولکولی پایین، اسیدهایی که درجه حرارت انتقال شیشه‌ای پایین دارند و درجه حرارت اعمال شده، بستگی دارد (Mani *et al*., 2002). بر اساس جدول ۷ غیر از پودرهای تولیدی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پودرها در دسته پودرهایی با پیوستگی متوسط قرار گرفتند. شاکری (۱۳۹۲) در خشک کردن پاششی آبغوره و Jakubczyka (۲۰۱۱) در خشک‌کردن کف‌پوشی سیب نیز به نتایج مشابه رسیدند.

قابلیت جریان

مقدار عددی پارامتر اندیس کار در این مطالعه در محدوده ۱۵/۲ تا ۲۴/۶۷ بود (جدول ۷). قابلیت جریان به خصوصیات فیزیکی پودر مانند شکل و اندازه ذره، ساختار سطحی، دانسیته ذره، دانسیته توده و میزان رطوبت بستگی دارد (Kim *et al*., 2002). قابلیت جریان پودر با اندیس کار (CI) سنجیده می‌شود. هرچه درصد اندیس کار پودر افزایش یابد، قابلیت جریان پودر ضعیف‌تر می‌شود. طبق جدول ۷ با افزایش دمای خشک‌کردن، به‌طور معنی‌داری درصد اندیس کار از ۲۴/۶۷ درصد به ۱۵/۲ درصد کاهش یافته و قابلیت جریان پودر بهتر می‌شود؛ چرا که با افزایش دمای خشک‌کردن، رطوبت کاهش می‌یابد. رطوبت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت جریان پودر دارد. افزایش میزان رطوبت به دلیل افزایش پل‌های مایع میان ذرات پودر، منجر به کاهش قابلیت جریان

پودر شد. همچنین افزایش میزان رطوبت، باعث نرم شدن یا پلاستیکی شدن پودر به‌خصوص اجزای محلول در آب می‌شود و در نهایت باعث تغییر شکل شده، سطح تماس بیشتری را ایجاد می‌کند و قابلیت جریان پودر کاهش یافت (Kim *et al*., 2005). خرازپور و همکاران (۱۳۹۴) در خشک‌کردن کف‌پوشی آبغوره و ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) در خشک‌کردن پاششی ژل آلوورا و اعظمی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی خواص فیزیکوشیمیایی شیر حاوی شیرین بیان و پودر آن به خشک شده روش پاششی نتایج مشابهی گزارش کردند. پودرهای به‌دست آمده در دمای ۴۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد دارای قابلیت جریان خوب و پودرهای به دست آمده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد دارای قابلیت جریان نسبتاً خوب بودند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف آب کرفس جهت خشک‌کردن به روش کف‌پوشی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. شرایط بهینه جهت تولید کف، با کمترین دانسیته و کمترین حجم زهکشی با صمغ زانتان ۰/۴۲ درصد، کنسانتره پروتئین آب پنیر ۶ درصد و زمان هم‌زدن ۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه تعیین شد. نتایج بیانگر کاهش مقادیر فعالیت آبی و رطوبت، دانسیته توده، دانسیته ضربه و دانسیته ذره با افزایش دمای خشک‌کردن بود. همچنین با افزایش دمای خشک‌کردن، میزان عددی نسبت هاسنر و شاخص کار، کاهش پیدا کرد. پودرهای تولیدی دارای پیوستگی متوسط و قابلیت جریان خوب بودند. با افزایش دمای خشک‌کردن از ۴۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش دما و کاهش رطوبت، امکان نزدیک شدن و به هم چسبیدن ذرات و در نتیجه پر شدن فضاهای خالی بین آن‌ها کمتر شده، تخلخل افزایش یافت. بررسی‌ها نشان داد که خشک‌کردن کف‌پوشی روشی مناسب برای تولید پودر آب کرفس بود.

منابع

Akintoye, O. A. & Oguntunde, A. O. 1991. Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soy milk. *Drying Technology*, 9 (1),245–262.

Alleoni, A. C. C., & Antunes, A. 2004. Albumen foam stability and s-ovalbumin contents in eggs coated with whey protein concentrate. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, 6(2): 105-110.

Amoli,N, . 1384. The investigation of celery cultivation on different sowing dates in spring and autumn cultivation in Mazandaran climate, Mazandaran agricultural and Natural Resources Research Center-Research Department of Seedling and seed preparation and plant improvement.

AOAC, Official Methods of Analysis. 1984. Association of official analytical chemist (14th Ed.). Washington, DC.

Asokapandian, S., Venkatachalam, S., Swamy, G.J. & Kuppusamy, K. 2014. Foam Mat Drying of Food Materials: A Review, *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6):3165–3174.

Atarodi, M. R. 1393. Optimization of process parameters for spirulina platensis foam-mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Azami,t. 1393. Formulation, preparation and evaluation of physicochemical, rheological and sensory characteristics of licorice blended milk and its powder (cocoa powder substitution). MSc thesis. in food science and technology Shiraz University of Iran.

Azizpour, M. 1391. Optimization of process parameters in foaming and evaluation of mass transfer kinetics in foam mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Bag, S. K., Srivastav, P. P., & Mishra, H. N. 2011. Optimization of process parameters for foaming of bael (Aegle marmelos L.) fruit pulp. *Food and Bioprocess Technology*, *4*(8), 1450-1458.

Barbosa-Canovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., and Yan, H. 2005. Food powders: Physical properties, processing, and functionality. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Bhandari, B. R., & Howes, T. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, *40*(1), 71-79.

Bikerman, J.J. 1973. *Foams*. New York, USA: Springer-Verlag.

Carp, D. J., Bartholomai, G. B., & Pilosof, A. M. R. 1997. A kinetic model to describe liquid drainage from soy protein foams over an extensive protein concentration range. *LWT-Food Science and Technology*, *30*(3), 253-258.

Carr, R. L. 1965. Evaluating flow properties of solids.

Chegini,G.R. & Ghobadian B. 2005. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder,Drying Technology,23:657–668.

Dickinson and G. Stainsby (Eds). 1987. Elsevier Applied Science. Barking, UK, 91-122.

Dickinson, E., Stainsby, G. 1982. Colloids in Foods. Applied Science Publishers Ltd., New York.

Ebrahimi, m. 1394. Effect of spray drying conditions on the physicochemical properties and functional components of aloe vera gel powder. MSc thesis Tabriz University Faculty of Agriculture.

Falade, K. O., & Omojola, B. S. 2010. Effect of processing methods on physical, chemical, rheological, and sensory properties of okra (Abelmoschus esculentus). *Food and Bioprocess Technology*, *3*(3), 387-394.

Falade, K.O., Adeyanju, K.I., & Uzo-Peters, P. I. 2003. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents. *European Food Research and Technology*, *217*(6), 486-491.

Farshadfar, Sh. 1385. Milk processing and production technology of dairy products. Print first. Fars Engineering Research Center, Shiraz.

Fazaeli, M., Djomeh, E.Z., Ashtari, K.A. and Omid, M. 2012. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. Food and Bioproducts Processing 90: 667-675.

Fennema, O. R., & Tannenbaum, S. R. 1996. Introduction to food chemistry. *Food Science and Technology-New York-Marcel Dekker-*, 1-16.

Franco, T.S., Perussello, C.A., Ellendersen, L.N. Masson, M.L. 2016. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder, *LWT-Food Science and Technology* 66:503-513.

Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. 2005. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *Journal of Food Engineering*, *66*(1), 35-42.

Hart, M. R., Ginnette, L. F., Morgan, A. I., & Graham, R. P. 1963. Foams for foam-mat drying. *Food Technology, 17*(10), 1302.

Hausner, H. H. 1967. *Friction conditions in a mass of metal powder*. Polytechnic Inst. of Brooklyn. Univ. of California, Los Angeles.

Hertzendorf, M. S., Moshy, R. J., & Seltzer, E. 1970. Foam drying in the food industry. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, *1*(1), 25-70.

Holdsworth, S. D. 1985. Optimisation of thermal processing—a review. *Journal of Food Engineering*, *4*(2), 89-116.

Horuz, E., Altan, A. & Maskan, M . 2012. Spray Drying and Process Optimization of Unclarified Pomegranate (Punica granatum) Juice, *Drying Technology: An International Journal*,30(7):787-798.

Izadi, T. 1393. Survey on WPC (Whey Protein Concentrate) function in formation and stability of cheese foam and optimization of cheese powder production using foam mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Jakubczyka, E., Gondeka, E., & Tamborb, K. 2011. Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method. In *Food Process Engineering in a Changing World. Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food* (pp. 1385-1386).

Jaya, S., & Das, H. 2004. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 125-134.

Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. 2008. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194-205.

Kadam, D. M., & Balasubramanian, S. 2011. Foam mat drying of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *35*(4), 488-495.

Kalantari,m. 1390. Investigation of physical and chemical characteristics of grape syrup, date and dried figs powders in a rolling dryer. MSc thesis. Shiraz University of Iran.

Karim, A. A., and Wai, C. C. 1999. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13:

Kaur, S., Sarkar, B. C., Sharam, H. K. & Singh, C. 2009. Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 96–100.

Khalilian, S, Shahidi, F, Mohebbi, M, Khalilian, M. 1392. Evaluation of drying conditions on some characteristics of pomegranate concentrate powder using the 23rd National Congress of Food Science and technology, Shiraz, Shiraz University, p 1-6.

Kharazpour, B. 1394. Preparation and Evaluation of Physicochemical Characteristics of Foam-mat Dried Unripe Grape Juice. . MSc thesis. Shiraz University.

Kim, E. H. J., Chen, X. D., & Pearce, D. 2005. Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *46*(3), 182-187.

Kim, E. H.-J., Chen, X. D., and Pearce, D. 2002. "Surface characterization of four industrial spray dried dairy powders in relation to chemical composition, stracture and wetting peoperty,." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 26: 197- 212.

Koc, B., Eren, I., & Ertekin, F. K. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, *85*(3), 340-349.

Kolawole, O. F., *and* Okocha, O. J. 2010. Foam-mat drying of plantain and cooking banana (*Musa* spp.). *Food Bioprocess Technology*, 5 (4), 1173- 1180.

Kudra, T and C. Ratti . 2006. Foam-Mat drying: Energy and cost analysis. *Canadian* Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., and Virseda, P. 2000. Thin-layer drying behaviour of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, 18: 995–1006.

Lal sajjadi, A. 1396. Foam mat drying of milk cream: optimization of foaming condition and investigation of powder properties. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Madamba, P. S., & Liboon, F. A. 2001. Optimization of the vacuum dehydration of celery (*Apium graveolens*) using the response surface methodology. *Drying Technology*, *19*(3-4), 611-626.

Mani, S., Jaya, S., & Das, H. 2002. Sticky issues on spray drying of fruit juices. In *ASAE/CSAE North-Central Intersectional Meeting*.

Mortazavi, A. Rouhani, K & Joyandeh, H. 1384. Milk and dairy products technology. Fourth edition. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad.

Mott, C.L., Hettiarachchy, N.S., and Qi, M. 1999. Effect of xanthan gum on enhancing the foaming properties of whey protein isolate. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(11): 1383-1386.

Muthukumaran, A. 2007. Foam-mat freeze drying of egg white and mathematical modeling. MSc Thesis. McGill University.

Papalamprou, E. M., Makri, E. A., Kiosseoglou, V. D., and Doxastakis, G. I. 2005. Effect of medium molecular weight xanthan gum in rheology and stability of oil in-water emulsion stabilized with legume proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12): 1967-1973.

Paseban, A. 1391. Optimization of process parameters for foam mat drying of mushroom (*Agaricus bisporus*) puree.MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Peighambardoust,H & Sarabandi, KH . 1394. The effect of spray drying conditions on physico-chemical properties of malt extract Powder production, Journal of Food Technology Research, 314-299: (2) 25.

Peivast, GH. 1384. Vegetable working, Third printing, Rasht: Daneshpazir Publishing.

Pourmahdi, A. 1391. Optimization of potato-powder production using foam mat method. MSc thesis. Islamic Azad University, Mazandaran Science and Research Branch.

Prins, A. 1988. *Principles of Foam Stability*. Advances in food emulsions and foams.

Raharitsifa, N., Genovese, D.B., and Ratti, C. 2006. Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science*, 71(3): 142–151.

Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G.S.V., and Ratti, C. 2007. Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Drying Technology*, 25 (2): 357 – 365.

Salahi, M. R., Mohebbi, M., & Taghizadeh, M. 1394. Foam‐Mat Drying of Cantaloupe (Cucumis melo): Optimization of Foaming Parameters and Investigating Drying Characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(6), 1798-1808.

Salehi,a. 1390. Determination of physical properties of citrus juice powder produced using by spray drying. MSc thesis. Shiraz University of Iran.

Sankat, C. K., & Castaigne, F. 2004. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *LWT-Food Science and Technology*, *37*(5), 517-525. *Society*, 76(11): 1383-1386. the foaming properties of whey protein isolate. *Journal of the American Oil Chemists'*.

Shakeri, Sh. 1392. Investigation of physicochemical properties of Verjuice and powder produced by spray dryer and assessment of drying conditions. Master thesis in Food science and technology. Shiraz: Faculty of Agriculture, Shiraz University.

Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S. 2007. Drying characteristics and quality of banana foam-mat. *Journal of Food Engineering*, 86 (4): 573–583.

Vernon-Carter, E. J., Espinosa-Paredes, G., Beristain, C. I., & Romero-Tehuitzil, H. 2001. Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam-mats. *Food Research International*, *34*(7), 587-598.

Wilde, P. J., and Clark, D. C. 1996. *Foam formation and stability*. In G. M. Hall (Ed.), Methods of testing protein functionality. Blackie Academic and Professional. London. PP, 110- 152.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 2, June. July. 2021, p. 217- 231

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۰ ص.۲۳۱-۲۱۷

Optimization of foam production in foam mat drying of celery juice and evaluation of its powder properties

M. Kamali Sarvestani[1], M.Moebbi[2*], M.Taghizadeh[3]

Received: 2019.12.04
Accepted: 2020.02.22

Introduction: Celery is one of the most consumed and highly nutritious vegetables with high dietary fiber, phytochemicals, vitamins, and minerals, which offers great benefits for utilization as a functional food ingredient. Fruit and vegetable juice powders have many benefits and economic advantages over their liquid precursors such as reduced volume/weight, reduced packaging, easier handling/ transportation, and much longer shelf-life. Also powders can be reconstituted to produce a juice and used for preparation of products such as snacks, chutney, soups, baby foods, etc. In foam-mat drying, food liquids and pastes are first whipped into stable foam by the addition of different foaming agents or stabilizing agents and then dried in the form of thin layer. This foam structure dries rapidly due to the increase of the surface area of the material by incorporating air/gas and forms a porous structure which gives high quality and instant properties of the dried product. The dried product is scraped off from the drying surface in the form of flakes, which is then converted to a fine powder. Response surface methodology (RSM) is a combination of mathematical and statistical techniques used to investigate the interaction effects of independent variables on responses. There is considerable information on foam-mat dried food powders, but there is no any scientific literature related to foam-mat drying of celery juice. The present research was thus focused on optimizing the foaming conditions (WPC as a foaming agent, Xanthan gum (XG) concentration as the stabilizer and whipping time (WT)) to minimize foam density (FD) and drainage volume (DV) using RSM. The effects of drying temperatures on some physicochemical properties of powder was also investigated.

Materials and methods: Celery was purchased from the local market .XG and WPC powders were purchased from Sigma Chemical Company (St. Louis, MO) and Milei Company Germany, respectively. Celery juice was extracted by using a juicer machine (Robert Bosch Stand mixer MMB 2000 /05 FD 8611 Type CNSM03EV, 600W, Slovenia). Based on preliminary tests, XG solutions were prepared by dissolving the appropriate amount of the defined gum powder in distilled water and stirring with a magnetic stirrer to achieve a uniform solution. This solution was refrigerated at 4°C overnight to complete hydration. RSM was used to estimate the main effects of the process variables on FD and DV in celery juice foam. The experiment was established based on a face-centered central composite design (FCCD). According to the experimental design, to prepare 100 g of samples, the appropriate amount of celery juice, WPC, and XG solution were poured to a 250 mL beaker. Then the mixture was placed into a water bath for 5 minutes at 55 °C temperature. The mixture was then taken out of water bath and was whipped by a mixer (Gosonic, model No. GHM- 818, 250W, China) with the maximum speed of 5400 rpm at ambient temperature during the given time. The density of foamed celery juice was determined in terms of mass over volume and expressed in g/cm3. To assess foam stability, the drainage test was performed for 1h. Furthermore, the effects of drying temperatures on some physicochemical properties of powders were investigated.

Results and discussions: The quadratic model was selected as a suitable statistical model for both FD and DV. ANOVA showed that this model is significant for both responses. Moreover, lack-of-fit was not significant for response surface models at a 95% confidence level, indicating that this model is adequately accurate for predicting responses. Based on the constrain criteria, the optimized foaming parameters were: XG concentration of 0.42% (w/w), WPC concentration of 6% (w/w), and WT of 9.30 min. The amount of FD and FDV for foam at these optimum conditions were 0.4 g/cm3 and 0 ml, respectively. The results showed the moisture content and water activity of the celery powders decreased with the increase in drying temperature. By increasing drying temperature from 40 to 70 °C, bulk density also decreased. Increase in drying temperature results in decrease in moisture content and bulk density. Tapped density generally behaves similar to bulk density because by shaking powder, the space between the particles is filled and occupied volume by the powder is reduced. By increasing in temperature, particle density decreased. Overall, with increasing drying temperature, the porosity of powder increased. Increasing temperature and reducing moisture content, the possibility of approaching and join together of particles is increased and the space between the particles becomes less. The numerical value of the car index parameter in this study was 15.3% to 24.67%. The highest value of flowability

---

1, 2 and 3. MSc Student, Professor and Assistant professor Department of food science & technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
Corresponding Author Email:mohebbatm@gmail.com

related to the sample was dried at 70°c. With decreasing in drying temperature, the moisture content of powders increased and due to forming liquid bridges between particles making them less flowable. The numerical value of the Hausner parameter in this study was 1.15 to 1.32. Except for powder produced at 70 °C, the powder was placed in the intermediate cohesiveness powder class. By increasing drying temperature, the cohesiveness of powder decreased significantly.

Keywords: Celery juice, Foam mat drying; Response surface methodology, Physicochemical properties